

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

le titre d'Ingénieur-Docteur

par

Michel LÉGER

PREMIÈRE THÈSE : Étude de la mesure de l'échauffement de l'air
lors d'une explosion nucléaire.

DEUXIÈME THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 29 novembre 1960, devant la Commission d'examen.

JURY

MM. ROCARD,	<i>Président.</i>
DELLOUE,	} <i>Examineurs.</i>
COMOLET.	



12, Place Henri-Bergson, 12
PARIS-(VIII^e)
1962

THESES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

pour obtenir

le titre d'Ingénieur-Docteur

par

Michel LÉGER

PREMIÈRE THÈSE : Étude de la mesure de l'échauffement de l'air
lors d'une explosion nucléaire.

DEUXIÈME THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 29 novembre 1960, devant la Commission d'examen.

JURY

MM. ROCARD,	<i>Président.</i>
DELLOUE,	} <i>Examineurs.</i>
COMOLET.	



12, Place Henri-Bergson, 12
PARIS-(VIII^e)



Faculté des Sciences de l'Université de Paris

Doyen J. PÉRÈS

Professeurs.

MM. G. JULIA	T	Analyse et Algèbre supérieures.	MM. FORTET.....	T	Calcul des Probabilités.
DE BROGLIE	T	Théories physiques.	SCHWARTZ	T	Calcul diff. et intégral.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées	CHOUARD	T	Physiologie végétale.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées.	MALAVARD.....	T	Aviation (Techn. aéronaut.).
PERES.....	T	Mécanique des fluides et applica-	BRELOT.....	T	Calcul différentiel.
		tions.	NORMANT.....	T	Synthèse organique générale.
BOURCART.....	T	Géographie physique et Géologie	BENARD.....	T	Chimie (E.N.S.C.P.).
		dynamique.	BUVAT	T	Botanique (E.N.S.).
PLANTEFOL	T	Botanique.	DUGUE	T	Statistiques Mathématiques.
GRASSÉ	T	Évolution des êtres organisés.	SOULAIRAC.....	T	Psychophysiologie.
PREVOST	T	Chimie organique.	ULRICH	T	Physiologie végétale (E.N.S.).
BOULIGAND	T	Analyse appliquée à la Géométrie.	MARECHAL.....	T	Optique théorique et appl.
CHAUDRON	T	Chimie appliquée.	KIRRMANN.....	T	Théories chimiques.
WYART	T	Minéralogie et Cristallogr.	CHADEFAUD.....	T	Botanique.
TEISSIER	T	Zoologie.	LE BRETON.....	T	Physiologie.
MANGENOT	T	Biologie vég. (Orsay).	MM. SALEM.....	T	Mathématiques générales.
AUGER	T	Physique quantique et Relativité.	LELONG	T	Mathématiques générales.
MONNIER	T	Physiologie des fonctions.	DEVILLERS.....	T	Anatomie et Histologie comparées.
PIVETEAU	T	Paléontologie.	EHRESMANN.....	T	Topologie algébrique.
ROCARD.....	T	Physique (E.N.S.).	FRANCON.....	T	Physique (S.P.C.N.).
CARTAN.....	T	Mathématiques (E.N.S.).	GLAUGEAUD.....	T	Géographie physique et Géologie
LAFFITTE.....	T	Chimie générale.			dynamique.
FAVARD.....	T	Géométrie supérieure.	GODEMENT.....	T	Mathématiques (M.P.C.).
COULOMB.....	T	Physique du Globe.	PISOT	T	Calcul des probabilités.
M ^{11a} COUSIN	T	Biologie.	ROCH	T	Géologie.
MM. CHRETIEN	T	Chimie minérale.	SCHATZMAN.....	T	Astrophysique.
DRACH.....	T	Zoologie.	TERMIER	T	Paléontologie stratigraphique.
KASTLER.....	T	Physique (E.N.S.).	ZAMANSKY	T	Mathématiques générales.
EPHRESSI.....	T	Génétique.	LENNUIER	T	Physique (P.C.B.).
RIVIERE.....	T	Géologie (Orsay).	RIZET.....	T	Génétique (Orsay).
GAUTHERET.....	T	Biologie (P.C.B.).	ROUTHIER.....	T	Géologie appliquée.
LUCAS R.....	T	Recherches physiques	M ¹⁰⁰ TONNELAT.....	T	Relativité.
THOMAS A.....	T	Biologie cellulaire.	MM. DIXMIER.....	T	Mathématiques (M.P.C.).
ARNULF.....	T	Optique appliquée.	SOUCHAY	T	Chimie (P.C.B.).
MORAND.....	T	Physique Enseignement.	AIGRAIN	T	Électrotechnique générale.
SOLEILLET.....	T	Physique (P.C.B.).	BRUSSET	T	Chimie minérale.
FORTIER.....	T	Mécan. expérimentale des fluides.	M. LEVY	T	Physique théorique des hautes
DANJON.....	T	Astronomie.			Énergies (Orsay).
PETIT.....	T	Biologie maritime.	M ^{100a} CHAIX.....	T	Chimie biologique.
QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmos-	HUREL-PY	T	Biologie végétale (P.C.B.).
		phérique.	MM. PIAUX	T	Chimie (S.P.C.N.).
GALLIEN	T	Embryologie.	BRUN.....	T	Mécan. expérimentale des fluides.
EICHORN.....	T	Biologie végétale (P.C.B.).	LEDERER.....	T	Chimie biologique.
DE CUGNAC	T	Biologie végétale (S.P.C.N.).	M ^{100a} DUBREIL.....	T	Mathématiques (Agrég.).
M ^{11a} CAUCHOIS.....	T	Chimie Physique.	LELONG	T	Mathématiques (E.N.S.).
MM. THELLIER.....	T	Physique du Globe.	MM. BELLAIR.....	T	Géologie (S.P.C.N.).
L'HERITIER.....	T	Biologie générale (Orsay).	COTTE	T	Physique (M.P.C.).
GRIVET.....	T	Radioélectricité (Orsay).	DUBOIS J.E.....	T	Chimie (M.P.C.).
PONCIN.....	T	Mécanique générale.	LAMOTTE.....	T	Zoologie (E.N.S.).
DUBREIL	T	Arithmétique et Théorie des Nom-	MICHEL André	T	Chimie minérale (Orsay).
		bres.	OLMER.....	T	Énergétique générale.
QUELET.....	T	Chimie organique.	ROUAULT.....	T	Physique.
CAGNIARD.....	T	Géophysique appliquée.	GAUTHIER.....	T	Mécanique appliquée.
CHAMPETIER.....	T	Chimie Macromoléculaire.	BARCHIEWITZ.....	T	Chimie Physique.
CUVILLIER.....	T	Micropaléontologie.	BROSSEL.....	T	Physique atomique.
JUNG	T	Pétrographie.	BUSER		Biologie animale (P.C.B.).
TRILLAT	T	Microscopie et diffraction élec-	CAMUS		Biologie végétale (P.C.B.)
		tronique.	CASTAING.....	T	Physique (Orsay).
WIEMANN.....	T	Chimie organique et struct.	CURIEN.....	T	Minéralogie et Cri. tallogr.
JACQUINOT.....	T	Spectroscopie (Orsay).	MOYSE.....	T	Physiologie végétale (Orsay).
VASSY	T	Physique de l'Atmosphère.	PANNETIER.....	T	Chimie (Orsay).
DESTOUCHES.....	T	Théories physiques.	POSSOMPES.....	T	Biologie animale (P.C.B.).
PRUVOST.....	T	Géologie.	PULLMANN	T	Chimie théorique.
AMIEL.....	T	Chimie des Solides.	TEILLAC	T	Physique nucléaire et Radioactivité
HOCART.....	T	Minéralogie et Cristallographie.			(Orsay).
J.P. MATHIEU.....	T	Recherches Physiques.	TONNELAT.....	T	Biologie physico-chimique,
COUTEAUX.....	T	Biol. animale (P.C.B.).	VILLE.....	T	Économétrie.
MAY	T	Zoologie (Orsay).	WILLEMART.....		Chimie (P.C.B.).
CHOQUET	T	Théorie des fonctions et Topologie.	DODE.....	T	Chimie (Orsay).
FELDMANN.....	T	Biologie végétale (P.C.B.).	FREYMANN.....	T	Physique (S.P.C.N.).
GUINIER.....	T	Physique des Solides (Orsay).	GUINOCHET.....	T	Biologie végétale (Orsay).
JOST	T	Physiologie comparée.	ROLLET	T	Chimie (P.C.B.).

M ^{lle} JOSIEN	T	Chimie (P.C.B.).	M ^{me} COUTURE.....	Thermodynamique et Mécanique Physique.
CHEVALLEY.....	T	Géométrie algébrique et théorie des groupes.	MM. ELLENBERGER.....	Géologie Appliquée.
MM. ARNOULT	T	Électronique (Orsay).	FRANC.....	Biologie animale (P.C.B.).
CHAPELLE.....	T	Physique (Orsay).	SCHNELL.....	Botanique tropicale (Orsay).
DELANGE.....	T	Mathématiques (Orsay).	STOLKOWSKI	Biologie animale (P.C.B.).
DENY	T	Mathématiques générales (Orsay).	ACHER.....	Chimie biologique (Orsay).
GERMAIN	T	Mécanique théorique des fluides.	BAUDOUIN.....	Biologie.
LUCAS G.	T	Géologie	BEAUMONT.....	Biologie animale.
ALLARD	T	Chimie Physique.	BLAMONT.....	Géophysique Ionosphère.
BERTHELOT.....	T	Physique fondamentale des Hautes-Énergies (Orsay).	BOURREAU	Biologie végétale (S.P.C.N.) (Orsay).
BRICARD.....	T	Météorologie.	CURIE D.....	Physique (M.G.P.).
M ^{me} ALBE-FESSARD		Psychophysiologie.	DURAND-DELGA	Géologie.
MM. FRIEDEL		Physique des Solides (Orsay).	FREON	Chimie organique (Orsay).
M. JULIA		Chimie organ. structurale.	HELLER	Physiologie végétale.
LENDER		Biologie Animale (S.P.C.N.) (Orsay).	TORTRAT	Calcul des Probabilités.
MAGAT		Physico-chimie des rayonnements.	CAILLEUX.....	Géologie (S.P.C.N.).
M ^{lle} QUINTIN	T	Électrochimie.	MAGNAN.....	T Physique (P.C.B.).
MM. MONOD	T	Biochimie cellulaire.	DAUDEL.....	Mécanique ondulatoire appliquée à la Chimie théorique et à la Physique nucléaire.
BENOIT	T	Physiol. anim. (Orsay).	M ^{lle} FOURCROY.....	Biologie végétale (S.P.C.N.).
DE POSSEL.....	T	Analyse numérique.	MM. BARRAUD	Physiologie cellulaire.
CHARLOT	T	Chimie analytique.	NOIRÔT	Évolution des êtres organisés.
HAISSINSKY	T	Radiochimie.	M ^{me} FOURES-BRUHAT.....	T Mécanique analyt. et Mécanique céleste.
LEMER.....	T	Physiol. B.M.P.V. (Orsay).	M ^{lle} VEIL	Physiologie générale.
GUERIN.....	T	Chimie (Orsay).	MM. LWOFF.....	T Microbiologie.
CHATELET M.		Chimie (P.C.B.).	SIESTRUNCK.....	T Mécanique physique et expérimentale.
JEAN		Physique (Orsay).	LACOMBE	T Métallurgie (Orsay).
MATTLER.....	T	Physique (Orsay).	BROCHARD	T Physique P.C.B. (Orsay).
MICHEL Louis		Physique théorique (Orsay).	CABANNES.....	T Mécanique générale.
RUMPF		Chimie (P.C.B.).	LESIEUR	T Mathématiques M.P.C. (Orsay).
BERGERARD		Biol. anim. (S.P.C.N.) (Orsay).	MAZET.....	T Mécanique générale (Orsay).
BERTIN.....		Electronique (Orsay).		
BOUSSIÈRES.....		Chimie des Radioéléments (Orsay).		

Secrétaire général. R. POUILLAIN.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur le Professeur Y. ROCARD, Directeur du Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure, qui a bien voulu m'accepter dans son Laboratoire et me donner l'idée de cette étude. Je remercie également le Commissariat à l'Énergie Atomique et le Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure de l'aide bienveillante et efficace qu'ils m'ont apportée.

PREMIÈRE THÈSE

Étude de la mesure de l'échauffement de l'air lors d'une explosion nucléaire

L'énorme énergie libérée par unité de masse dans une explosion nucléaire établit de très hautes températures dans la boule de feu.

Une importante fraction de l'énergie nucléaire, environ 33 pour 100 est libérée sous forme thermique.

Lors d'une explosion de matière fissile, équivalente à celle de 100 kt de trinitrotoluène, une quantité de chaleur d'environ $3,3 \times 10^{10}$ kilocalories, correspondant à une énergie de 40 millions de kilowatts-heures, est délivrée en quelques fractions de seconde.

Les effets physiques produits sont multiples : échauffement du sol et de l'air ambiant ; inflammation des matières combustibles : bois, papiers, tissus ; brûlures importantes.

Nous nous sommes intéressé à l'échauffement de la couche d'air qui recouvre le sol. Cette couche absorbe une fraction du rayonnement infrarouge direct et du rayonnement infrarouge émis par le sol porté lui-même à des températures très élevées. A des distances de plus d'un kilomètre du point zéro ⁽¹⁾, la température du sol atteint encore plus de 1 500 °C.

Cet échauffement instantané de l'air ambiant ne peut pas être mesuré par des procédés classiques, les appareils employés ayant une constante de temps thermique trop importante. Il est donc nécessaire de trouver une grandeur physique liée aux variations instantanées de la température de l'air.

Or, la vitesse de propagation d'un son de fréquence quelconque dans un fluide qui s'échauffe est fonction de la température de ce fluide.

On peut donc, à partir de cette remarque, effectuer la mesure d'une variable qui représentera, à un facteur constant près, l'échauffement de l'air ambiant.

I. Principe de la mesure d'échauffement de l'air par l'intermédiaire de la vitesse du son. — Une onde sonore sinusoïdale se propage dans la direction Ox à la vitesse c (fig. 1).

A l'origine O , la pression sonore est représentée par

$$P_0 = p_0 \sin \frac{2\pi\tau}{\Theta};$$

$F = \frac{1}{\Theta}$ est la fréquence d'excitation de la source sonore.

⁽¹⁾ On désigne par point zéro le lieu d'une explosion nucléaire.

A l'abscisse x , cette pression est représentée par

$$P_x = p_x \sin 2\pi \left(\frac{\tau}{\Theta} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

La pression sonore à l'abscisse x présente un retard $\tau_x = \frac{x}{c}$ auquel correspond un déphasage $\varphi = \frac{2\pi x}{\lambda}$ par rapport à la pression sonore à l'origine ; c désignant la célérité de la propagation.

Comme $\lambda = c\Theta = \frac{c}{F}$, on peut écrire $\varphi = \frac{2\pi x F}{c}$. (1).

Nous pouvons supposer que la propagation s'effectue dans un air sec. La célérité c est alors donnée en fonc-

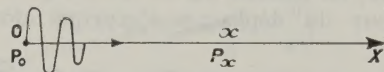


Fig. 1. — Propagation d'une onde sonore sinusoïdale.

tion de la température T en degrés Kelvin par la formule

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (2) \quad \begin{cases} T_0 = 273 \text{ °K} \\ c_0 = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}} = 331,45 \text{ m/s,} \end{cases}$$

c_0 est la célérité dans l'air supposé gaz diatomique à la température de zéro degré Celsius et à la pression de 760 tors.

On peut écrire

$$c_{(m/s)} = 331,45 \sqrt{1 + \frac{t}{273}},$$

t étant exprimé en degrés Celsius.

Si nous explicitons la relation (1), il vient

$$T = T_0 \left(\frac{\varphi_0}{\varphi} \right)^2$$

φ_0 étant le déphasage existant à 0 °C.

Il importe alors de réaliser un appareillage permettant d'enregistrer la nouvelle variable φ fonction de la variable c elle-même fonction de la température T de l'air ambiant. Cet appareillage comportera un ensemble acoustique et un ensemble électronique.

II. Etude d'un dispositif de mesure. — Supposons qu'une onde sonore fournie par un haut-parleur

(fig. 2) se propage dans la direction $\vec{OX}$ et qu'elle soit captée par un microphone sensible à la pression. A l'abscisse X le déphasage φ existant entre la pression sonore à l'origine O où est située la source sonore et la pression sonore en X s'écrit

$$\varphi = \frac{2\pi XF}{c_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}}.$$

Mais l'appareillage électronique ne permettra de mesurer que le déphasage φ_m existant entre les deux

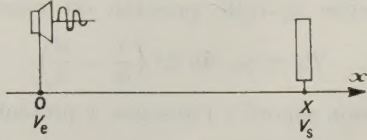


Fig. 2. — Dispositif de mesure initial.

tensions électriques sinusoïdales V_e d'attaque du haut-parleur et V_s de sortie du microphone.

Soit $\varphi_m = \varphi + \varphi_e$, φ_e dépendant du haut-parleur et du microphone.

D'autre part, la distance X de propagation est mal définie; on mesure $X_m = X + X_e$.

La valeur du déphasage s'exprime alors par la formule

$$\varphi = \varphi_m - \varphi_e = \frac{2\pi(X_m - X_e)F}{c_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}},$$

ou

$$T = \frac{4\pi^2 T_0 F^2}{c_0^2} \frac{(X_m - X_e)^2}{\varphi_m - \varphi_e}.$$

Il est donc nécessaire d'évaluer les grandeurs φ_e et X_e pour connaître la valeur de la température T .

A. Evaluation de φ_e . — Dans le cas pratique, le haut-parleur rayonne dans l'espace et le cône travaille sur les deux faces. On peut représenter mécaniquement le haut-parleur par le schéma de la figure 3.

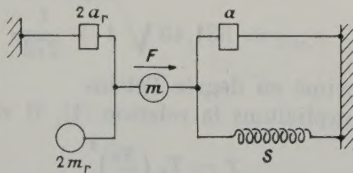


Fig. 3. — Représentation mécanique d'un haut-parleur.

La masse équivalente M du haut-parleur se compose de sa masse propre m et de la masse fictive, dite de rayonnement, $2m_r$.

$$M = m + 2m_r.$$

L'amortissement total f comprend l'amortissement propre de la suspension et l'amortissement supplémentaire $2a_r$ dû à la vibration du haut-parleur dans l'air.

Lord Rayleigh a calculé m_r et a_r selon les formules

$$\begin{cases} m_r = \frac{\rho c S}{\omega} \frac{4y}{\pi} \left(\frac{1}{3} - \frac{y^2}{3^2 \cdot 5} + \frac{y^4}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} \dots \right), \\ a_r = \rho c S \left(\frac{1}{2} \frac{y^2}{2^2} - \frac{y^4}{4^2 \cdot 6} + \frac{y^6}{4^2 \cdot 6^2 \cdot 8} \dots \right). \end{cases}$$

dans lesquelles

$$y = \frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{2\pi d F}{c},$$

S est la surface du piston équivalent.

Soit u la vitesse vibratoire du piston équivalent. La force appliquée étant sinusoïdale, nous pouvons écrire

$$\begin{cases} (jM\omega + f + \frac{k}{j\omega}) u = Bli = P_0 S, \\ (R + jL\omega) i + Blu = V_e, \end{cases}$$

P_0 étant la pression existant au droit du piston équivalent, c'est-à-dire celle à l'abscisse origine 0; d'où

$$\begin{aligned} V_e = \frac{S}{Bl} \left[R + \frac{B^2 l^2 f \omega^2}{(k - M\omega^2)^2 + f^2 \omega^2} \right] P_0 \\ + j \frac{S}{Bl} \left[L\omega + \frac{B^2 l^2 (k - M\omega^2)}{f^2 \omega^2 + (k - M\omega^2)^2} \omega \right] P_0. \end{aligned}$$

Cette relation montre que V_e présente un déphasage Ψ_e par rapport à P_0

$$V_e = KP_0 + jHP_0 \quad \text{et} \quad \text{tg } \Psi_e = \frac{H}{K}.$$

De même, le microphone électrodynamique employé introduira un déphasage Ψ'_e tel que

$$V_s = K' P_x + jH' P_x \quad \text{et} \quad \text{tg } \Psi'_e = \frac{H'}{K'}.$$

La tension de sortie du microphone est fournie au secondaire d'un transformateur; en appelant Ψ_r le déphasage introduit par le transformateur, nous aurons exactement

$$\varphi_m = \Psi + \Psi'_e + \Psi_r - \Psi_e.$$

$$\text{Soit} \quad \varphi_m = \varphi + \varphi_e$$

$$\text{avec} \quad \varphi_e = \Psi_r + \text{arc tg } \frac{H'}{K'} - \text{arc tg } \frac{H}{K};$$

le déphasage φ_e dépend donc de grandeurs fonctions de la température: la masse fictive de rayonnement et l'amortissement supplémentaire dû à la charge acoustique.

Si nous choisissons une fréquence F très supérieure à la fréquence f_0 de résonance du transducteur, nous pouvons écrire

$$V_e = \frac{S}{Bl} [R + R_1] P_0 + j \frac{S\omega}{Bl} [L + L_1] P_0$$

où R_1 et L_1 sont très petits devant R et L .

Le déphasage φ_e ne dépend plus que des caractéristiques du transducteur, mais son évaluation reste délicate.

B. Evaluation de X_e . — Il est pratiquement impossible d'évaluer exactement la distance de propagation X , l'abscisse de la source sonore étant mal définie. Il faut donc éliminer la grandeur X_e par un dispositif de mesure approprié que nous allons étudier.

III. Dispositif de mesure employé. — Dans ce dispositif schématisé en figure 4, deux microphones identiques reçoivent, en deux points M_1 et M_2 , l'onde sonore émise par le haut-parleur.

Soient V_e la tension d'attaque du haut-parleur, V_{s1} et V_{s2} les tensions de sortie des microphones. Nous pouvons écrire :

φ_{m1} étant le déphasage de V_{s1} par rapport à V_e

$$\varphi_1 = \varphi_{m1} - \varphi_e = \frac{2\pi F}{c_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} (X_{m1} - X_e);$$

φ_{m2} étant le déphasage de V_{s2} par rapport à V_e

$$\varphi_2 = \varphi_{m2} - \varphi_e = \frac{2\pi F}{c_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} (X_{m2} - X_e);$$

φ_m étant le déphasage de V_{s1} par rapport à V_{s2}

$$\varphi_m = \varphi_{m1} - \varphi_{m2} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi F}{c_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} X_m.$$

Le déphasage mesuré φ_m est égal à la valeur exacte du déphasage existant entre les pressions sonores en M_1 et M_2 .

D'autre part, la distance X_m entre les deux axes des bobines des microphones est facile à déterminer avec une bonne approximation. C'est la distance séparant les deux points M_1 et M_2 où est captée l'onde sonore, $X_m = X$.

Ce dispositif de mesure présente l'avantage d'éliminer les grandeurs φ_e et X_e dont la variation éventuelle et l'indétermination constituent une source supplémentaire d'erreurs.

Le déphasage φ_m existant entre V_{s1} et V_{s2} sera évalué par un appareillage électronique faisant fonction de phasemètre. On déduira alors la température T de l'air ambiant où se propage le son

$$T = T_0 \frac{4\pi^2 F^2 X_m^2}{c_0^2} \frac{1}{\varphi_m^2}.$$

L'ensemble complet de mesure comprendra donc :

1° un ensemble acoustique dans lequel un haut-parleur émet un son de fréquence F ; deux microphones M_1 et M_2 sont placés dans l'axe du haut-parleur à des distances respectives D_1 et D_2 .

2° un ensemble électronique dans lequel un générateur à basse fréquence attaque le haut-parleur par l'intermédiaire d'un amplificateur de puissance. Les deux tensions alternatives de sortie des microphones V_{s1} et V_{s2} préalablement amplifiées attaquent un phasemètre; la tension de sortie continue est proportionnelle au déphasage $\varphi_m = \varphi$, déphasage existant entre les pressions sonores en M_1 et M_2 .

3° un ensemble enregistreur dans lequel deux sortes

d'enregistrements sont prévues : un enregistrement photographique et un enregistrement magnétique. Nous allons étudier successivement chaque ensemble.

IV. Etude des ensembles de mesure. —

A. Ensemble acoustique. — Cet ensemble comprend un haut-parleur et deux microphones.

Une fraction importante de la puissance sonore est rayonnée suivant l'axe du haut-parleur où nous effec-

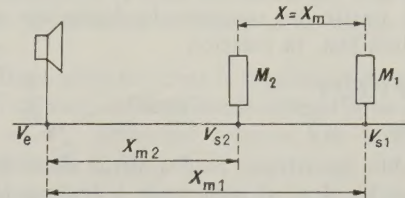


Fig. 4. — Schéma du dispositif de mesure.

tuons la mesure. Nous réduisons ainsi les réflexions perturbatrices sur des éléments extérieurs au « circuit » acoustique. Nous vérifions néanmoins avant chaque mesure que l'onde sonore suivant l'axe OX du haut-parleur est une onde progressive

$$P_x = p_x \sin \omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right)$$

p_x étant inversement proportionnel à la distance x .

Les deux microphones sont du type électrodynamique omnidirectionnel; ils sont livrés avec un transformateur de sortie à haute ou à basse impédance.

La membrane du microphone a un diamètre Φ_m inférieur à 10 mm. Si nous voulons considérer que nous captions la pression sonore en un point déterminé ou presque, il faut que le diamètre de la membrane soit bien inférieur à la longueur d'onde $\lambda = c/F$ de l'onde sonore.

Cette considération a été déterminante dans le choix de la fréquence $F = 2\,000$ Hz, Φ_m étant le plus petit diamètre de membrane que nous ayons trouvé.

Il faut également, pour effectuer des mesures correctes, que les deux microphones soient aussi identiques que possible et qu'ils subissent la pression sonore dans des conditions semblables. Dans ce dessein, nous avons effectué un choix parmi douze microphones que nous avons groupés par paires. Deux microphones ont été considérés comme identiques s'ils fournissaient deux tensions alternatives en phase lorsque nous les attaquons par la même pression sonore.

Les deux microphones et le haut-parleur sont fixés sur un châssis constitué de deux tubes pleins réunis par deux barres transversales. Le haut-parleur et le microphone M_1 sont fixes. M_2 est monté sur un chariot qui peut glisser sur les deux tubes. Nous pouvons ainsi régler la distance X des deux microphones M_1 et M_2 .

La fréquence choisie étant de 2 000 Hz, nous avons calculé $\bar{X}$ pour qu'une élévation de température de

20 °C à 150 °C environ produise une variation de phase $\Delta\varphi$ de 2π . Nous pensions ainsi pouvoir évaluer les variations de température de l'air ambiant sans que la réponse du phasemètre présente de discontinuité. Nous avons été conduit à prendre $X = 100$ cm.

La longueur totale du banc acoustique étant de 150 cm, le microphone M_2 se trouve à 50 cm, soit près de 3λ du haut-parleur.

Connaissant la fréquence F et la distance X , la courbe de $\varphi = f(T)$ permet de déterminer la température T à partir des mesures du déphasage φ .

Tout calcul fait, la relation

$$\varphi = \frac{2\pi X F \sqrt{T_0}}{c_0} \frac{1}{\sqrt{T}} \quad \text{s'écrit} \quad \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{99,8}{\sqrt{T}}$$

L'ensemble acoustique nous fournit donc deux tensions V_{s1} et V_{s2} dont il nous reste à évaluer le déphasage.

B. Ensemble électronique. — Dans la constitution de l'ensemble électronique, on peut distinguer deux sous-ensembles :

1° un circuit d'attaque du haut-parleur comprenant un générateur à basse fréquence et un amplificateur de puissance ;

2° un circuit mesure symétrique comprenant deux amplificateurs pour microphones, un phasemètre donnant une tension proportionnelle au déphasage.

L'alimentation de l'ensemble électronique est autonome. Des batteries fournissent la tension de chauffage des tubes et procurent à des alimentations à transistors la tension nécessaire à l'obtention d'une haute tension de 300 V ou de 200 V.

1. CIRCUIT D'ATTAQUE DU HAUT-PARLEUR. — La fréquence de la tension sinusoïdale d'attaque du haut-parleur doit être fournie par l'oscillateur avec le maximum de stabilité. En effet, si nous reprenons la formule

$$\varphi = \frac{2\pi X}{c_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} F,$$

à température constante $\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{dF}{F}$, une variation de 1 pour 100 de la fréquence provoque une variation relative identique $\frac{d\varphi}{\varphi}$.

L'évaluation de la température T sur la courbe $\varphi = f(T)$ tracée pour la fréquence F comportera une erreur dT telle que $dT/T = -2d\varphi/\varphi$ soit de 2 pour 100.

Si $t = 20$ °C, soit $T = 293$ °K, on a $dT \approx 6$ °K.

Donc une erreur de 1 pour 100 sur $\frac{dF}{F}$ occasionne une erreur $\frac{dT}{T} \approx 30$ pour 100, ce qui est inadmissible.

L'oscillateur à basse fréquence dont les caractéristiques étaient les meilleures s'est révélé être l'oscillateur à double T.

Nos mesures ont montré l'erreur relative $\frac{dF}{F} \approx \frac{1}{1\,000}$, soit une variation maximale de ± 2 Hz pour 2 000 Hz ; l'erreur relative $\frac{dT}{T}$ est alors voisine de 0,2 pour 100.

2° Oscillateur à basse fréquence. — Cet oscillateur comprend un pont à double T et un étage amplificateur (fig. 5). Une fraction de la tension de plaque du tube T_2 est ramenée sur la grille du tube T_1 . Cette tension est en phase avec la tension de grille V_{g1} . La tension de

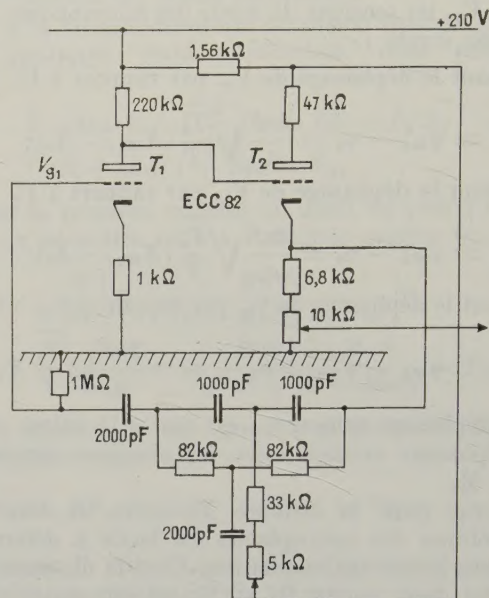


Fig. 5. — Schéma de l'oscillateur à pont à double T.

cathode du tube T_2 est ramenée sur la grille du tube 1 à travers le pont à double T ; elle est en opposition de phase avec V_{g1} .

Le pont à double T a une impédance de transfert nulle à la fréquence $F_0 = \frac{1}{2\pi RC}$; il n'y a donc contre-réaction que pour toutes les fréquences différentes de f_0 . La réaction permet au système d'osciller à la fréquence pour laquelle il n'existe pas de contre-réaction c'est-à-dire pour $F_0 = 2\,000$ Hz.

3° Amplificateur de puissance. — C'est un amplificateur classique comprenant un étage déphaseur, un étage amplificateur symétrique et un étage de sortie push-pull. Son fonctionnement est en classe A pour les signaux de niveau moyen ($< 0,3$ V) à l'entrée et en classe A/B pour les forts signaux. Sa puissance ne dépasse pas 3 W.

On peut admettre que le haut-parleur émet un son pur de 2 000 Hz, fréquence imposée par le générateur à basse fréquence.

2. CIRCUIT DE MESURE. — Les microphones fournissent deux tensions de sortie V_{s1} et V_{s2} de l'ordre de quelques millivolts. Une amplification de ces tensions

est nécessaire si l'on veut pouvoir déterminer leur déphasage.

1° *Amplificateur de tension.* — C'est un amplificateur du type « cascode ». Il comprend (fig. 6 et 7) deux étages d'amplification.

Supposons les deux tubes identiques ; nous pouvons écrire

$$E_s = -Ri_p = \frac{-R\mu(1 + \mu)u}{\Delta}$$

d'où

$$G = \frac{\mu(1 + \mu)R}{\Delta}.$$

Cette double triode d'entrée se comporte comme un

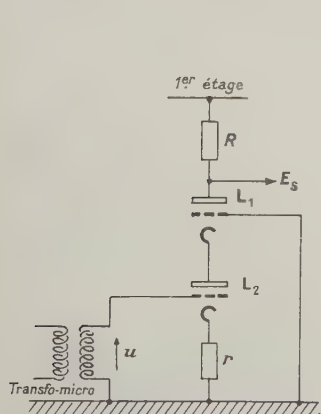


Fig. 6.

Schéma du premier étage de l'amplificateur de tension du type « cascode ».

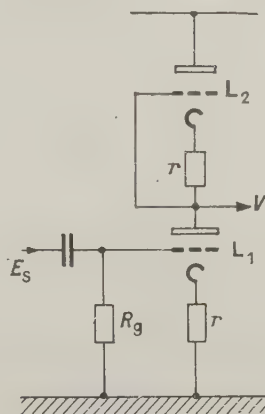


Fig. 7.

Schéma du deuxième étage de l'amplificateur de tension du type « cascode ».

tube unique de coefficient d'amplification $\mu_G = \mu(1 + \mu)$ et de résistance interne

$$\rho_1 = R_1 + R_1(1 + \mu) + (1 + \mu)^2 r.$$

Avec la double triode employée, une triode ECC 88, nous obtenons

$$\begin{cases} \mu_G = 1125 \\ \rho_1 \approx 0,87 \text{ M}\Omega. \end{cases}$$

C'est en quelque sorte une pentode, mais son souffle est beaucoup plus faible.

La valeur du gain G est voisine de 190.

Les deux tubes étant identiques, nous pouvons écrire :

$$V = \frac{-\mu E_s}{2} \quad \text{et} \quad G' = -\frac{\mu}{2}.$$

Pour la double triode ECC 88,

$$G' = 16,5.$$

Le gain total de l'amplificateur s'exprime par

$$G_A = \frac{R\mu^2(1 + \mu)}{(1 + \mu)^2 r + R_1(2 + \mu) + R}.$$

Pour l'amplificateur réalisé, ce gain G_A est voisin de 3 100.

La tension V de sortie est la tension d'entrée du

phasemètre. Sa valeur efficace doit être comprise entre 1 V et 2,5 V ; la tension de sortie minimale des microphones étant de 3 mV environ, l'amplificateur cascode réalisé doit avoir un gain maximal de l'ordre de 500.

Nous réglons le gain de l'amplificateur à l'aide d'une contre-réaction reliant la sortie (V) à la cathode du tube d'entrée.

Nous avons construit deux amplificateurs rigoureusement identiques et nous avons vérifié que le déphasage entre les tensions d'entrée et de sortie était égal à $\pm 2k\pi$.

Nous allons alors mesurer le déphasage existant entre V_1 et V_2 ; ce sera celui existant entre V_{s1} et V_{s2} , donc entre P_1 et P_2 , pressions sonores que subissent les microphones M_1 et M_2 .

2° *Phasemètre.* — Nous disposons de deux tensions sinusoïdales dont nous voulons évaluer le déphasage ; l'appareil comprendra deux voies symétriques et une voie unique mesurant une grandeur proportionnelle au déphasage des tensions d'entrée.

Les tensions d'entrée, préalablement amplifiées, sont transformées en tensions rectangulaires par une bascule de Schmidt. Un étage dérivateur fournit des impulsions positives et négatives ; les impulsions positives sont éliminées et les impulsions négatives attaquent un multivibrateur bistable. Une tension de plaque de cet appareil de largeur θ est transformée en tension rectangulaire à l'aide d'une deuxième bascule de Schmidt. Un circuit intégrateur prend alors la valeur moyenne de cette tension rectangulaire.

Le schéma complet du phasemètre est indiqué en figure 8.

3. *ETUDE DE LA TENSION DE PLAQUE DU MULTIVIBRATEUR BISTABLE.* — Lorsque le déphasage φ des deux tensions V_{A_1} et V_{A_2} varie de ε à $2\pi - \varepsilon$, θ est proportionnel à φ , et par conséquent la valeur moyenne $V_c = V_m \theta / \Theta$ est également proportionnelle au déphasage φ .

$$\theta = \frac{\varphi}{\omega}, \quad V_c = \frac{V_m}{\omega \Theta} \varphi,$$

soit

$$V_c = \frac{V_m}{2\pi} \varphi, \quad \text{avec} \quad \varepsilon \leq \varphi \leq 2\pi - \varepsilon.$$

Pour les valeurs $\varphi = \begin{cases} 0 \\ 2\pi \end{cases}$ le multivibrateur reçoit les mêmes impulsions sur les deux voies ; il se comporte comme un diviseur de fréquence 1/2, la valeur moyenne des tensions carrées est alors $V_c = \frac{V_m}{2}$.

La courbe $V_c = f(\varphi)$ présente une discontinuité pour $\varphi = \begin{cases} 0 \\ 2\pi \end{cases}$; elle admet pour période $\varphi_T = 2\pi$; nous retrouvons donc la même courbe pour

$$2k\pi \leq \varphi \leq 2(k + 1)\pi ;$$

nous écrirons alors

$$V_c = \frac{V_m}{2\pi} (\varphi - 2k\pi).$$

1° *Etude de la zone de discontinuité.* — Nous sommes ramenés à une étude des constantes de temps du multivibrateur bistable.

Supposons (fig. 9) que le tube I soit conducteur et

le tube II bloqué. La grille du tube I reçoit une impulsion négative à $\tau = 0$; nous pouvons alors distinguer deux phases :

a) de $\tau = 0$ à $\tau = \tau_0$, les deux tubes I et II sont bloqués ;

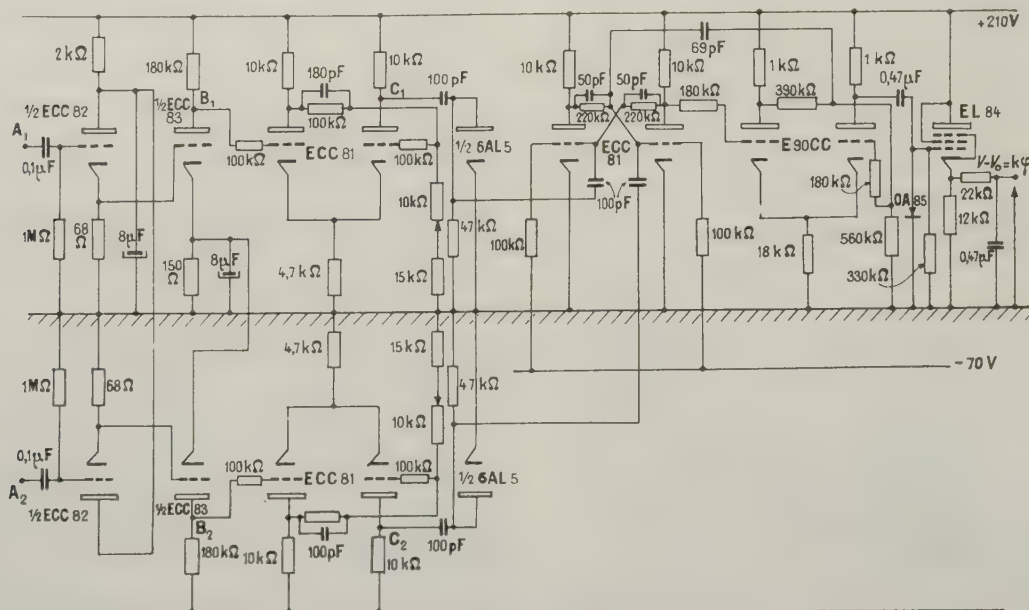


Fig. 8. — Schéma complet du phasemètre.

b) à partir de $\tau > \tau_0$, le tube II devient conducteur, le tube I restant bloqué.

Il est donc intéressant de déterminer les constantes de temps régissant le blocage du tube I et la conduc-

tion du tube II. Nous connaissons ainsi les temps de montée et de descente des tensions de plaque du multivibrateur.

Nous déterminerons alors la valeur minimale de θ , largeur de la tension rectangulaire, pour que le bistable fonctionne encore convenablement. Nous pourrions déterminer la plage $2k\pi - \Delta\phi$, $2k\pi + \Delta\phi$ dans laquelle le multivibrateur indique un déphasage correspondant à $\phi = 2k\pi$.

a) *Etude du régime a).* — Les constantes de temps régissant la variation de la tension d'anode du tube I, V_{p1} seront données par l'étude du circuit représenté en figure 10, circuit où s'effectue le régime transitoire.

Le calcul de ces constantes de temps s'effectuera en déterminant l'impédance opérationnelle $Z(p)$ entre les bornes C et D.

Posons $C_0 = C_1 + C_g$, C_1 étant la capacité de liaison du bistable et du circuit dérivateur. Nous pouvons écrire

$$Z(p) = R_b \frac{1 + Ap}{1 + Bp + Ep^2} \quad \text{avec} \quad R_b = \frac{R_p(R + R_g)}{R_p + R + R_g},$$

R_g et R_p désignant respectivement la résistance de

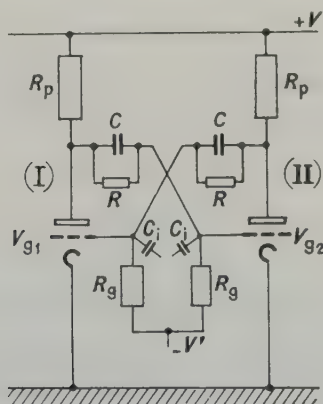


Fig. 9. — Schéma de principe du multivibrateur bistable.

tion du tube II. Nous connaissons ainsi les temps de montée et de descente des tensions de plaque du multivibrateur.

Nous déterminerons alors la valeur minimale de θ , largeur de la tension rectangulaire, pour que le bistable fonctionne encore convenablement. Nous pourrions déterminer la plage $2k\pi - \Delta\phi$, $2k\pi + \Delta\phi$ dans laquelle

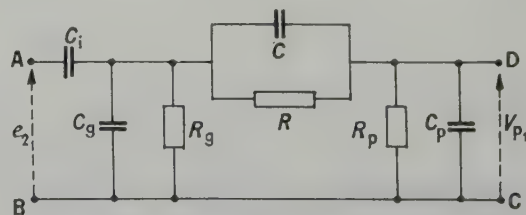


Fig. 10. — Schéma électrique équivalent du multivibrateur bistable en régime a).

grille et la résistance de plaque ; R désignant la résistance d'une liaison grille-plaque (fig. 10).

Les racines de l'équation $1 + Bp + Ep^2 = 0$ déterminent les constantes de temps

$$-\frac{1}{p_1} \quad \text{et} \quad -\frac{1}{p_2}$$

avec

$$\begin{cases} p_1 = -\frac{B}{2E} + \sqrt{\frac{B^2}{4E^2} - \frac{1}{E}} = -0,1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}, \\ p_2 = -\frac{B}{2E} - \sqrt{\frac{B^2}{4E^2} - \frac{1}{E}} = -3,02 \times 10^6 \text{ s}^{-1}. \end{cases}$$

La tension de plaque V_{p1} s'écrit

$$V_{p1} = V_0 + \alpha e^{p_1 \tau} + \beta e^{p_2 \tau},$$

Les constantes de temps cherchées sont

$$\tau_1 = -\frac{1}{p_1} = 10 \mu\text{s} \quad \text{et} \quad \tau_2 = -\frac{1}{p_2} = 3,3 \mu\text{s}.$$

Nous avons relevé à l'oscillographe un temps de montée d'environ $7,5 \mu\text{s}$; ceci s'explique par la prépondérance des termes en $e^{p_2 \tau}$.

b) Etude du régime b). — Le tube II est alors conducteur et les constantes de temps régissant la variation

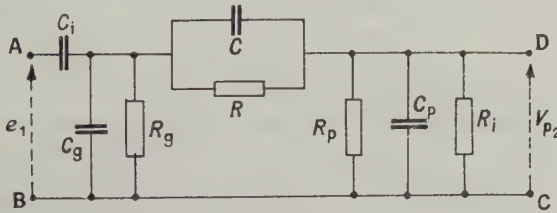


Fig. 11. — Schéma électrique équivalent du multivibrateur bistable en régime b).

de la tension de plaque V_{p2} seront déterminées par l'étude du circuit représenté en figure 11.

Le tube II étant conducteur, sa résistance interne R_i est en parallèle sur l'impédance précédente

La nouvelle impédance opérationnelle s'écrit

$$Z'(p) = \frac{Z(p)R_i}{R_i + Z(p)} = R'_b \frac{1 + Ap}{1 + Dp + Fp^2}$$

avec

$$R'_b = \frac{R_b R_i}{R_b + R_i}.$$

Nous en déduisons

$$\begin{cases} p_3 = -\frac{D}{2F} + \sqrt{\frac{D^2}{4F^2} - \frac{1}{F}} = 0,13 \times 10^6 \text{ s}^{-1}, \\ p_4 = -\frac{D}{2F} - \sqrt{\frac{D^2}{4F^2} - \frac{1}{F}} = -5,47 \times 10^6 \text{ s}^{-1}. \end{cases}$$

La tension de plaque V_{p2} s'écrit

$$V_{p2} = V'_0 + \alpha' e^{p_3 \tau} + \beta' e^{p_4 \tau}.$$

Les constantes de temps cherchées sont

$$\tau_3 \simeq 7,6 \mu\text{s} \quad \text{et} \quad \tau_4 \simeq 1,86 \mu\text{s}.$$

Le temps de descente de la tension de plaque du

multivibrateur bistable est donc inférieur au temps de montée.

À l'oscillographe, nous avons relevé un temps de descente de l'ordre de $3,5 \mu\text{s}$; ceci s'explique par la prépondérance des termes en $e^{p_4 \tau}$.

2° Limites de la zone de discontinuité. — La tension de plaque du multivibrateur bistable présentant l'allure

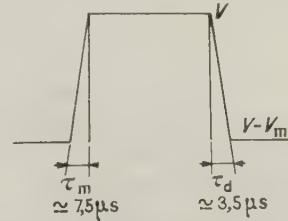


Fig. 12. — Allure de la tension de plaque du multivibrateur bistable.

indiquée en figure 12, nous allons établir le comportement du phasemètre pour les faibles déphasages.

Pour $F = 2\,000 \text{ Hz}$, un déphasage de 1° est représenté par une tension rectangulaire de largeur $\theta_1 = 1,4 \mu\text{s}$.

Nous ne pouvons, compte tenu des constantes de temps du multivibrateur bistable, mesurer correctement des déphasages inférieurs à $\varphi = \frac{11}{1,4} = 8^\circ$.

Pour $\varphi = \pm \Psi$ avec $\Psi \leq 8^\circ$,

et plus généralement

$$\varphi = 2k\pi \pm \Psi \text{ avec } \Psi \leq 8^\circ,$$

le phasemètre indiquera un déphasage égal à $2k\pi$.

Tout se passe comme si dans une voie du phasemètre s'introduisait un déphasage supplémentaire $\pm \Psi$.

Nous éviterons cet écueil en introduisant dans une voie du phasemètre un déphasage supplémentaire $\Psi' = \pi$; le déphasage φ des deux tensions attaquant le phasemètre sera $\varphi = 2k\pi \pm \Psi + \pi = (2k + 1)\pi \pm \Psi$.

Le phasemètre n'indiquera plus la valeur $V_m/2$ correspondant à $\varphi = (2k + 1)\pi$, mais les valeurs V_1 ou V_2 correspondant à $\varphi_1 = (2k + 1)\pi + \Psi$ ou $\varphi_2 = (2k + 1)\pi - \Psi$.

Le réglage consistant à éliminer l'erreur de mesure $\pm \Psi$ introduite par le multivibrateur s'effectuera en recherchant l'obtention de la valeur moyenne $V_m/2$ pour deux tensions d'entrée déphasées de $2k\pi$ puis de $(2k + 1)\pi$.

a) Mise en phase et en opposition de phase de deux tensions. — Le schéma de la figure 13 montre que pour la position

$$(1) \begin{cases} (a) \varphi_{V_{A_1} V_{A_2}} = \varphi_{V_{E_1} V_{E_2}} - \pi, \\ (b) \varphi_{V_{A_1} V_{A_2}} = \varphi_{V_{E_1} V_{E_2}} \end{cases} \quad \text{et} \quad (2) \begin{cases} (a) \varphi_{V_{A_1} V_{A_2}} = 2k\pi \\ (b) \varphi_{V_{A_1} V_{A_2}} = (2k + 1)\pi \end{cases}$$

la même tension est appliquée aux deux entrées.

Le système de mise en opposition de phase est un amplificateur de gain $g = -1$. Nous avons

$$g = \frac{-\mu}{(\mu - 1) \left[\frac{R_k}{R_p} + \frac{1}{(\mu - 1)} \cdot \frac{R_1}{R_p(1 + \mu)} \right]} \approx \frac{\mu}{\mu + 2} \approx -1.$$

Nous pouvons donc conclure que le multivibrateur fournira une tension de plaque représentant le déphasage φ des tensions d'entrée pour φ compris entre

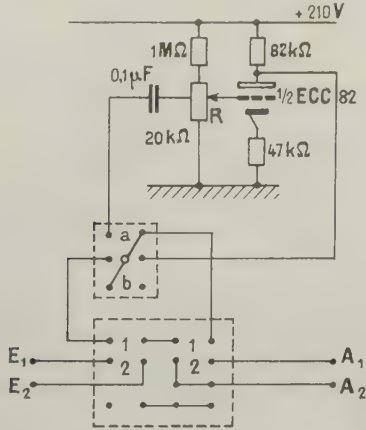


Fig. 13. — Schéma relatif à la mise en phase et en opposition de phase de deux tensions.

$2k\pi + \Psi$ et $2(k + 1)\pi - \Psi$ ($\Psi < 10^\circ$) si l'on ne peut intervenir manuellement pour ajouter un déphasage supplémentaire de $\pm \pi$ qui permettra la mesure des déphasages inférieurs à Ψ .

Le choix de la fréquence $F = 2\,000$ Hz doit nous permettre, lors des mesures de variation de température, d'éviter la plage d'incertitude $2k\pi \pm \Psi$.

b) Intégration de la tension de plaque du multivibrateur bistable. — La tension de plaque du multivibrateur bistable attaque préalablement une bascule de Schmidt qui améliore nettement la forme des tensions rectangulaires. Nous obtenons des temps de basculement de l'ordre de $0,25\ \mu\text{s}$.

Le phasemètre délivre une tension continue variant linéairement avec φ

$$V = V_0 + \frac{V'_m \theta}{\Theta} = V_0 + \frac{V'_m \varphi}{2\pi}$$

où V_0 est la tension de sortie de la cathode « follower » lorsque les deux entrées du phasemètre sont reliées à la masse. Nous allons étudier l'enregistrement de cette tension V .

C. Ensemble d'enregistrement. — 1. ENREGISTREMENT PHOTOGRAPHIQUE. — La tension de sortie du phasemètre est appliquée par l'intermédiaire d'un amplificateur continu à l'oscillographe d'un enregistreur photographique. L'amplificateur continu symétrique est schématisé en figure 14.

Les deux tubes de l'amplificateur continu étant sup-

posés identiques, la tension d'attaque V_r de l'oscillographe est une fraction de la tension de sortie V_s de l'amplificateur continu.

$$V_r = \alpha \frac{\mu R_p}{R_p + R_1} (e_1 - e_2)$$

$$e_1 = \beta V = \beta \left(V_0 + \frac{V'_m \varphi}{2\pi} \right)$$

et e_2 est une tension fixe obtenue par un pont.

En posant $v = \beta V_0 - e_2$ il vient

$$V_r = \alpha \frac{\mu R_p}{R_p + R_1} \left(\beta \frac{V'_m \varphi}{2\pi} + v \right).$$

L'enregistreur photographique était un enregistreur Beaudouin A-1500, réglé pour un déroulement à la vitesse constante de 300 mm/s.

L'oscillographe, du type E 622, subit une déflexion totale sous une tension de 10,5 V, étant traversé par un courant de 1,05 mA.

2. ENREGISTREMENT MAGNÉTIQUE. — L'enregistrement magnétique s'effectue par modulation de fréquence. Une fraction de la tension de sortie du phasemètre βV préalablement amplifiée à l'aide d'un amplificateur continu symétrique polarise la grille d'un multivibrateur astable dont le potentiel de cathode est fixé à 150 V par un tube OA2 alimenté en série avec une résistance à partir de la tension de +300 V.

La courbe de Δf en fonction de ΔV_g (variation de la tension de grille) est linéaire dans une certaine plage où nous placerons le point de fonctionnement.

La valeur de la polarisation de repos V_{g_0} est de -7 V; elle correspond à la fréquence du multivibrateur astable $f_0 = 5,4$ kHz.

La profondeur de modulation pourra être importante $\Delta f \leq \pm 2$ kHz; Δf restera proportionnelle à

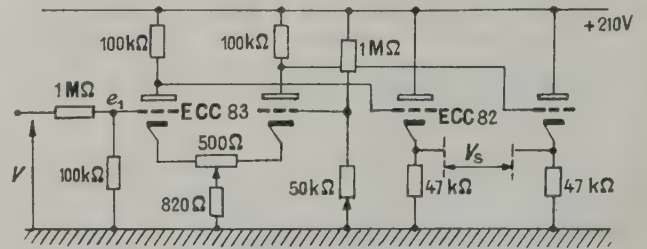


Fig. 14. — Schéma de l'amplificateur continu.

ΔV_g donc à $\Delta \varphi$ variation du déphasage existant entre les pressions sonores P_1 et P_2 .

La bande ± 2 kHz est largement suffisante pour les mesures que nous avons à effectuer.

La sortie du modulateur schématisé en figure 15 se présente sous la forme d'un pont diviseur. Nous pouvons ainsi appliquer à l'entrée de l'amplificateur d'un magnétophone la tension exigée, la vitesse de déroulement de la bande magnétique de ce dernier étant de 19 cm/s. Le constructeur mentionne alors une bande passante de 10 kHz.

V. Alimentation des ensembles de mesure. — La mesure des variations de température devant s'effectuer sur un champ de tir, l'ensemble électronique doit posséder une alimentation autonome tant pour le chauffage des tubes que pour la haute tension.

A. Chauffage des tubes. — La tension de chauffage, 6,3 V environ, est fournie sous 12 V à partir

d'une batterie d'accumulateurs de 60 A-h. La consommation totale est de 8 A.

B. Haute tension positive. — Cette tension est fournie par trois alimentations à transistors (1), (2), (3). (1) et (2) sont identiques et procurent, à partir

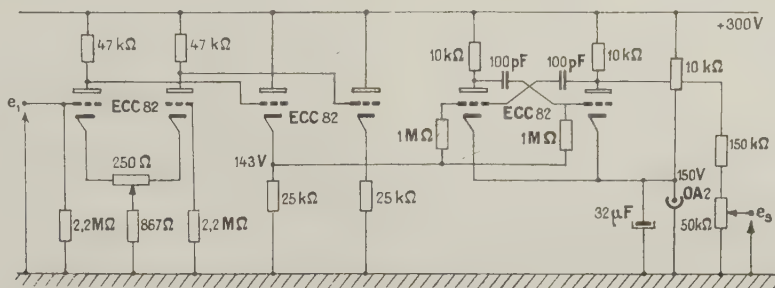


Fig. 15. — Schéma du modulateur.

de deux batteries d'accumulateurs de 15 A-h sous 6 V, une haute tension de 210 V.

L'alimentation (1) dessert l'amplificateur de puissance, le générateur à basse fréquence et les amplificateurs des microphones.

L'alimentation (2) dessert le phasemètre et l'amplificateur continu attaquant l'oscillographe de l'enregistreur photographique.

Une telle répartition a été prévue pour éviter toute oscillation due à un bouclage par l'impédance dynamique de la source à haute tension.

L'alimentation (3) fournit une haute tension de 300 V ; elle alimente uniquement le modulateur de l'enregistrement magnétique.

1. ÉLÉMENTS DES ALIMENTATIONS (1) ET (2). — Les deux transistors choisis sont du type 2N1160 dont la puissance est de 25 W et le courant collecteur ≤ 7 A.

Le transformateur comporte :

au primaire $N_p = 90$ spires, soit 2 fois 45, en fil de 12/10 ;
au secondaire $N_s = 1\,225$ spires en fil de 28/100.

Le tore de réaction comporte :

au primaire $N_p = 90$ spires en fil de 60/100 ;
en réaction $N_r = 2$ fois 13 spires en fil de 25/100.

Une résistance de protection destinée à éviter le courant de surcharge des diodes du pont redresseur est placée dans le circuit secondaire.

La puissance fournie par chaque alimentation est de 30 W environ. La haute tension est stabilisée par deux tubes OB2, soit à 210 V.

2. ÉLÉMENTS DE L'ALIMENTATION (3). — Le schéma est identique à celui des alimentations (1) et (2).

Les deux transistors sont du type SFT 114 dont la puissance est de 25 W et le courant collecteur ≤ 3 A.

Le transformateur comporte :

au primaire $N_p = 90$ spires, soit 2 fois 45 spires ;
au secondaire $N_s = 1\,500$ spires ;

Le tore de réaction comporte :

au primaire $N_p = 90$ spires ;
en réaction $N_r = 2$ fois 12 spires.

Cette alimentation fournit au secondaire une puissance de 20 W environ. La haute tension est stabilisée par deux tubes OA2, soit à 300 V.

C. Haute tension négative. — Cette tension est fournie à partir d'une pile donnant 10 mA sous 90 V ; elle permet de polariser les grilles du multivibrateur bistable à $V' = -70$ V.

VI. Ensembles de mesure sur le terrain. — Deux ensembles de mesure identiques ont été construits. Le premier est placé à 1 500 m du point zéro et le second à 2 000 m.

A. Disposition du matériel. — Le banc acoustique est posé sur le sol de telle façon que la médiatrice du segment M_1M_2 passe par le point zéro. Le flux thermique est reçu normalement à la direction de propagation du son. Le haut-parleur et les microphones reçoivent du flux direct le minimum de quantité de chaleur. Il a été toutefois prévu pour ces transducteurs une protection en plomb. L'appareillage électronique est placé dans un caisson enfoui dans le sol.

L'ensemble complet étant placé près du point zéro doit comporter une télécommande que nous nous proposons d'étudier.

B. Télécommande. — Nous disposons de deux instants de télécommande

$$\tau' \text{ à } -15 \text{ mn} \quad \text{et} \quad \tau'' \text{ à } -2 \text{ s.}$$

Le processus de fonctionnement de la boîte de télécommande (fig. 16) est le suivant :

A l'instant $\tau' = -15$ mn, le relais « travail » 9T se ferme. Les relais « travail » 1T et 2T sont excités.

Les hautes tensions $+ 300 \text{ V}$, $+ 210 \text{ V}$, $- 70 \text{ V}$ sont appliquées, ainsi que la tension de chauffage des tubes. Le magnétophone commence à enregistrer.

200 ms plus tard, le relais « travail » 1T se ferme ; les fusibles reliant les câbles de télécommandes fondent.

A l'instant $\tau'_1 = - 1,5 \text{ s}$, le relais « repos » R_{B5} s'ouvre et la batterie de $+ 24 \text{ V}$ ne débite plus dans les relais 1T et 2T.

A l'instant $\tau'' = - 2 \text{ s}$, le relais « travail » 8T se ferme, les relais « travail » 7T et 7bisT sont excités.

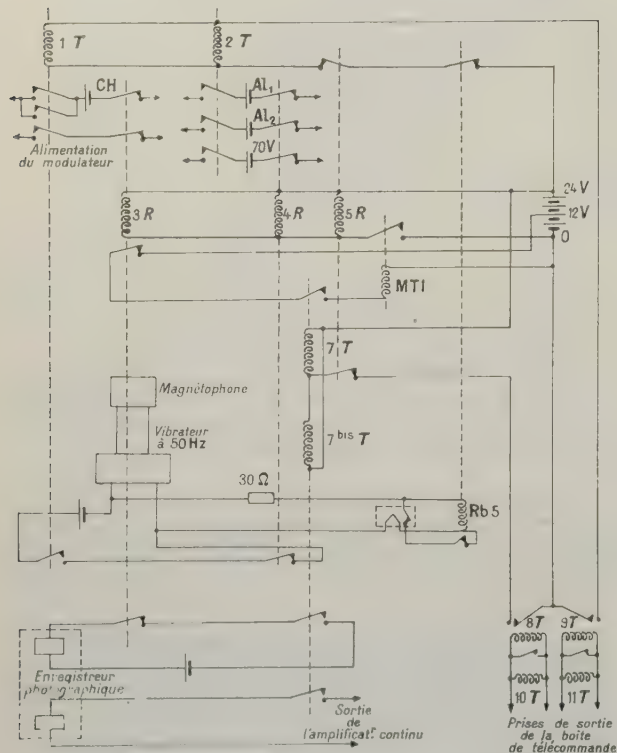


Fig. 16. — Schéma de principe de la boîte de télécommande.

L'enregistreur photographique est mis en marche ; la tension d'enregistrement est appliquée à l'oscillographe.

Le relais MTI, temporisé à 50 s, est excité.

A l'instant $\tau = 48 \text{ s}$ le relais MTI se ferme, les relais « repos » 3R, 4R, 5R sont excités.

Les hautes tensions $+ 300 \text{ V}$, $+ 210 \text{ V}$, $- 70 \text{ V}$ et la tension de chauffage ne sont plus appliquées à l'appareillage électronique. Les enregistrements magnétique et photographique sont arrêtés.

C. Etalonnage des enregistrements. — Pour interpréter quantitativement les résultats, nous avons tracé préalablement une courbe d'étalonnage.

Nous avons effectué un enregistrement correspondant aux déphasages $2k\pi$, φ et $\varphi - \pi$ par l'intermédiaire du système de mise en phase et en opposition de phase de deux tensions.

φ est le déphasage existant entre les pressions sonores P_1 et P_2 ; il correspond à la propagation de l'onde sonore à la température en degrés K de l'air ambiant.

$\varphi - \pi$ est obtenu en introduisant le déphasage supplémentaire $+\pi$ dans la voie provenant du microphone M_2 le plus proche du haut-parleur.

La courbe d'étalonnage $\varphi = f(\tau)$ répondant aux valeurs particulières $2k\pi$, φ et $\varphi - \pi$ permet de graduer l'axe des coordonnées de la courbe de mesure $\varphi_m = f(\tau)$ et de déterminer une origine.

De la valeur φ_m mesurée nous déduisons sur la courbe $\varphi = f(T_k)$ la température T_k correspondante.

D. Etude des enregistrements. — Nous avons pu obtenir des enregistrements à 1 500 m et à 2 000 m de distance.

Comme on le sait (Conférence de Genève, 1958), une explosion nucléaire provoque une forte impulsion électromagnétique. Nous la retrouvons comme effet parasite sur nos enregistrements, et même elle marque l'instant zéro.

Les deux enregistrements présentent une grande similitude.

Chaque courbe présente un palier correspondant à la température de l'air ambiant, température identique à celle qui régnait avant l'instant zéro. Pendant ce temps, le sol absorbe une partie du rayonnement thermique et s'échauffe. Il doit atteindre une température supérieure à $1\,000^\circ\text{C}$. La couche d'air qui le recouvre est alors soumise au rayonnement émis par le sol ; elle est portée à une température plus élevée.

Ce transfert de chaleur est aidé par la convection naturelle, qui se manifeste sur chaque courbe par des oscillations. Il est toutefois possible de déterminer la température maximale atteinte par cette couche d'air avant qu'elle n'ait tendance à s'élever. Dès que ce phénomène se produit, l'air chaud est remplacé par de l'air froid qui descend, c'est-à-dire de l'air sensiblement à la température initiale. Le rayonnement direct ne semble pas avoir échauffé l'air qui constitue un fluide très transparent.

Sur chaque enregistrement, nous retrouvons alors un palier correspondant à la température ambiante.

La température du sol décroît alors très rapidement en fonction du temps.

L'air froid ne peut s'échauffer de façon appréciable avant l'arrivée de l'onde de choc. L'appareillage de mesure est alors renversé, l'enregistrement n'est plus interprétable.

VII. Résultats quantitatifs. — **A. Enregistrements à 1 500 mètres.** — 1. **ENREGISTREMENT PHOTOGRAPHIQUE** (fig. 17a). — La vitesse de déroulement du papier est différente de celle prévue ; on ne peut donner une échelle des temps très précise ; 1 seconde est sensiblement représentée par 34,1 cm. D'autre part, le branchement de l'oscillographe est tel qu'il enregistre une tension en opposition de phase par rapport à celle de l'enregistreur magnétique. La

courbe d'étalonnage permet d'évaluer la température initiale, compte tenu de la vitesse d'un vent de 2 m/s soufflant dans la direction de la propagation du son.

Soit φ_1 le déphasage existant entre les pressions sonores P_1 et P_2 , nous pouvons écrire

$$\varphi_1 = 11\pi + \frac{1,6}{2,15}\pi = 11,745\pi.$$

La courbe $\varphi = f(T)$ donne $T_m = 288^\circ\text{K}$
soit $t_m = 15^\circ\text{C} = t_{\text{ambiant}}.$

Appelons v la vitesse du vent. Nous pouvons écrire

$$T_{\text{réelle}} = T_{\text{mesurée}} - (2Kcv + Kv^2)$$

avec $K = \frac{T_0}{c_0^2} = 2,49 \times 10^{-3}$

ou puisque $v = 2\text{ m/s}$, $T_r = T_m - 2Kcv$

Nous en déduisons $T_r = 284,64^\circ\text{K}$,

soit $t = 11,64^\circ\text{C}.$

Calculons alors l'élévation de température $\Delta T = \Delta t$

$$\Delta T = T_r^2 - T_r^1 = T_m^2 - T_m^1 - 2Kv(c_2 - c_1).$$

La courbe d'étalonnage fournit pour T_m^2 la valeur $T_m^2 = 328^\circ\text{K}$ correspondant au déphasage

$$\varphi_2 = 11,745\pi - \frac{1,6}{2,15} = 11\pi.$$

Nous en déduisons

$$\Delta T = 328 - 288 = 0,239,$$

$$\Delta T = 39,76^\circ\text{K} = \Delta t.$$

Calculons $t_r^2 = 11,64 + 39,76 = 51,4^\circ\text{C} = t_{\text{max}}.$

Cet enregistrement fournit les valeurs suivantes

$$t_{\text{ambiant}} = 11,64^\circ\text{C}, \quad t_{\text{max}} = 51,4^\circ\text{C}, \quad \Delta t = 39,76^\circ\text{C}.$$

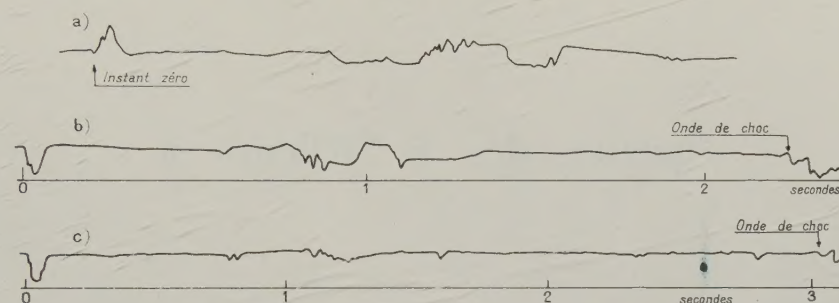


Fig. 17. — Reproductions d'enregistrements en fonction du temps τ : a) enregistrement photographique à 1 500 m du point zéro; b) enregistrement magnétique à 1 500 m du point zéro; c) enregistrement magnétique à 2 000 m du point zéro.

2. ENREGISTREMENT MAGNÉTIQUE (fig. 17b). — Cet enregistrement fournit, par un calcul identique au précédent les résultats suivants

$$t_{\text{ambiant}} = 10,65^\circ\text{C}, \quad t_{\text{max}} = 49,43^\circ\text{C}, \quad \Delta t = 38,78^\circ\text{C}.$$

3. ENREGISTREMENT A 2 000 MÈTRES (fig. 17c). — Seul l'enregistrement magnétique a donné les résultats suivants

$$t_{\text{ambiant}} = 12,62^\circ\text{C}, \quad t_{\text{max}} = 36,47^\circ\text{C}, \quad \Delta t = 23,85^\circ\text{C}.$$

Les mesures précédentes permettent de proposer les valeurs suivantes :

	t_{ambiant} en $^\circ\text{C}$	t en $^\circ\text{C}$
1 500 m	11,6	39,2
2 000 m	11,6	23,8

B. Diagrammes de température. — 1. DIAGRAMME A 1 500 MÈTRES. — Nous décelons le commencement de l'échauffement de l'air vers l'instant $\tau = 0,81\text{ s}$. Il est maximal à $\tau = 0,95\text{ s}$. La température est alors voisine de 51°C . Dès l'instant $\tau = 1,35\text{ s}$, l'air chaud étant remplacé par l'air ambiant, la température reprend la valeur initiale $t_1 \simeq 11,6^\circ\text{C}$.

2. DIAGRAMME A 2 000 MÈTRES. — Nous décelons le commencement de l'échauffement de l'air vers l'instant $\tau = 1\text{ s}$. Il est maximal à l'instant $\tau = 1,24\text{ s}$. La température est alors voisine de $35,5^\circ\text{C}$. Dès l'instant $\tau = 1,4\text{ s}$, l'air chaud étant remplacé par l'air ambiant, la température reprend la valeur initiale $t_1 \simeq 11,6^\circ\text{C}$.

C. Conclusions. — Les mesures effectuées nous conduisent aux conclusions suivantes :

a) L'échauffement de l'air est dû au rayonnement infrarouge émis par le sol porté à très haute température.

Il est assez faible aux distances du point zéro supérieures à 1 000 mètres.

b) L'air chaud est remplacé presque instantanément par l'air froid resté à la température ambiante.

c) L'onde de choc se propage dans de l'air à la température ambiante au-delà d'une certaine distance D du point zéro. Les enregistrements montrent que cette distance D est inférieure à 1 500 mètres.

Michel LÉGER.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Spectre des « Siffleurs ».

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 24 novembre 1960.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. PÉRÈS

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Jean SARRAILH.

